

# 衛星観測植生指標を利用した 全球農事暦プロダクトの高精度化

## IMPROVEMENT OF GLOBAL CROP CALENDAR PRODUCT USING SATELLITE-SENSED VEGETATION INDEXES

小槻峻司<sup>1</sup>・田中賢治<sup>2</sup>  
Shunji KOTSUKI and Kenji TANAKA

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院工学研究科 博士課程 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 京都大学 防災研究所 准教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

This study was conducted to improve a global crop calendar product using satellite-sensed vegetation indexes. In this study, we newly used EVI and SAVI, in addition to NDVI, to define crop calendar by phenological analysis. Using a global cropping map, parameters to define planting and harvesting dates are determined to three vegetation indexes. Estimated crop calendars using three vegetation indexes agree with a statistical crop calendar at approximately same level. Improvements of global crop calendar using EVI and SAVI are not captured. On the other hand, determining cropping parameters brings about improvement of the crop calendar, which causes an improvement of analyzed agricultural water usage.

**Key Words :** crop calendar, irrigation, vegetation index, NDVI, satellite-sensed data

### 1. はじめに

水資源管理の観点から、世界の水使用の70%以上を占める農業水需要量を全球で算出しようとの研究が行われている<sup>1), 2)</sup>。その解析には農事暦情報(播種・収穫時期)の整備が不可欠であり、精度の高い解析の鍵となる。

広域の範囲で農事暦を作成する手法は大きく3つに大別できる。1つは統計情報をベースに作成する方法であり、MIRCA2000<sup>3)</sup>やSACKS<sup>4)</sup>がある。これらのプロダクトは、Food and Agriculture Organization (FAO), USDA(U. S. Department of Agriculture)等の機関から提供される、国レベル・州レベルでの統計情報を基に作成されたプロダクトである。統計情報プロダクトは、データの得られる地域での信頼性が高いという利点がある。一方で、データの無い地域の信頼性や、同一国内・州内では農事暦の違いが反映されないといった短所も併せ持つ。次に作物生育モデルを活用する手法がある。作物生育モデルは、気温、日射、日長、水分ストレス等から作物成長を予報することで農事暦を作成する。全球で多様な作物を扱えるモデルとしてはSWIM<sup>5)</sup>が有名であり、全球水資源モデルに適用された例も多い(e.g. Hanasaki *et al.*<sup>1)</sup>)。作物生育モデルを利用する利点は、気象強制力から農事暦を計算

できる点であり、現在耕作が行われていない地域でも、耕作を行った場合の仮想実験が可能である。一方で、特に人間活動の影響が強い播種日の特定が困難であり、衛星情報や統計を利用した農事暦プロダクトと比較すると信頼性が低い。最後に、衛星観測情報を活用した農事暦の作成手法がある。この手法では、作物成長は時系列の植生指標(Vegetation Index: VI)によって推定され、特定の国・州を対象とした高解像度の農事暦推定が行われている(e.g. Sakamoto *et al.*<sup>6)</sup>)。衛星観測情報を利用する利点は、地表面状態の信頼度が高い点と、高解像度でデータが得られる点にある。一方で、作物の種類判別が難しく全球規模の研究は多く行われていない。

既往研究に示した、3つの農事暦手法をまとめると、表-1の様になる。本研究では、信頼度の高い統計情報、衛星情報を統合する事により、小槻ら<sup>2)</sup>による全球農事暦プロダクトの改善を目的とする。

表-1 農事暦の作成手法の比較

	解像度	作物分類	空間補間	将来計算	信頼性
統計情報	×	◎	×	×	◎
衛星解析	◎	×	◎	×	○
モデル	○	○	○	○	×

◎:最適, ○:適, ×:不適

小槻ら<sup>2)</sup>は、Yorozu *et al.*<sup>7)</sup>が提案したNormalized Difference Vegetation Index (NDVI)を用いた農事暦作成手法を全球に適用し、モデル計算<sup>1)</sup>により決定された農事暦に比して、統計データに対して同程度以上の適合度を持つ事を示した。加えて、衛星データを使用した場合には、現実の農事暦を大きくは逸脱しないという特性を示した。これは、光学センサーによる分光反射情報から計算される植生指標の利用により、作物生育の状態を現実的に捉える事が可能であるためである。

本研究では、以下2点の新たな試みにより、作成する全球農事暦の高精度化を図る。1点目は、NDVIに加えて、Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Enhanced Vegetation Index (EVI) を使用し、使用する植生指標によって、作成する農事暦の精度が向上するか否かを確認する。2点目は、生育期間の開始と終了を決定するパラメータを、全球作物分布情報MIRCA2000<sup>3)</sup>を用いて決定し、精度の向上を試みる。

農事暦の作成と検証の手順を図-1に示す。続く2章では、植生指標を用いた農事暦の決定手法を説明し(図-1(a))、耕作期決定パラメータ $nVIst$ と $nVIfn$ の推定手順を説明する(図-1(b))。3章では、作成した農事暦を既往研究・統計値と比較・検証すると共に(図-1(c-1))、作成した農事暦を陸面過程モデルの入力値として全球の農業水需要量を算定し、各国の統計値を用いて検証する(図-1(c-2))。最後に、4章では本研究のまとめを示す。

## 2. 植生指標を用いた農事暦の作成

### (1) 植生指標

植物のクロロフィルは、太陽光のうち赤領域の波長を光合成のために強く吸収し、近赤外領域の波長を反射す

る特徴を有する。その一方で、裸地や岩石に対しては、どちらの領域の波長もほぼ同じ反射率を示す。本研究で用いる3つの植生指標(以下、VI)、NDVI, EVI, SAVIは、このような植物の特徴を考慮して作成された指標であり、以下の式により計算される。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

$$SAVI = (1 + L) \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \quad (2)$$

$$EVI = 2.0 \cdot \frac{NIR - RED}{1 + NIR + 6 \cdot RED - 7.5 \cdot BLUE} \quad (3)$$

ここに、 $NIR, RED, BLUE$ はそれぞれ、近赤外領域、赤領域、青領域の反射率(-)である。SAVIの計算式中の $L$ は補正係数で、通常0.5が用いられる。SAVIは背景土壌の違いを除去する事に主眼がある。EVIは $BLUE$ が大気中の煙や霧に感度が高い事を利用して、 $RED$ の減衰を $BLUE$ で補正している<sup>8)</sup>。

NDVIは、Leaf Area Index (LAI)との関係性が高い一方で、時系列でみると地上バイオマスの増加に対してVIのピーク付近への到達が早く、ピーク付近が平らになりやすい。そこで、フェノロジーを適切に抽出するために、EVIを用いた農事暦推定・地表面被覆分類の研究も多く行われている(e.g. Sakamoto *et al.*<sup>6)</sup>)。本研究の手法では、VIのフェノロジーを用いて農事暦を推定するため、VIがピークに達しにくい特性を利用し、特に収穫期の推定農事暦の高精度化を期待してEVIを使用する。SAVIも、その関数形状から、NDVIに比して季節性が出やすい事が分かる。加えて、ピクセル中の背景土壌色の違いを除去する事による精度向上を期待し、SAVIを使用する。

本研究では、Spot Vegetationから提供される10日コンポジットデータを使用してVIを計算する。雲の影響は、検索範囲を30日としたBISE法<sup>9)</sup>により除去する。本研究

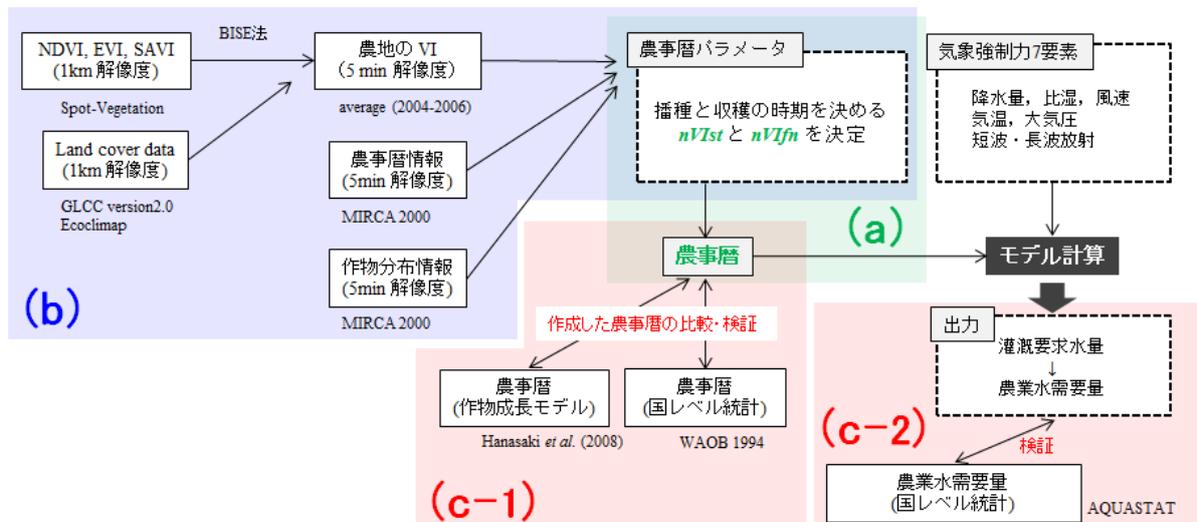


図-1 衛星観測植生指標を用いた農事暦の作成と検証の手順。(a)植生指標を用いた農事暦の決定手法を説明し、(b)耕作期決定パラメータ $nVIst$ と $nVIfn$ の推定手順を説明する。(c-1)作成した農事暦を既往研究・統計値と比較・検証すると共に、(c-2)作成した農事暦を陸面過程モデルの入力値として全球の農業水需要量を算定し、各国の統計値を用いて検証する。

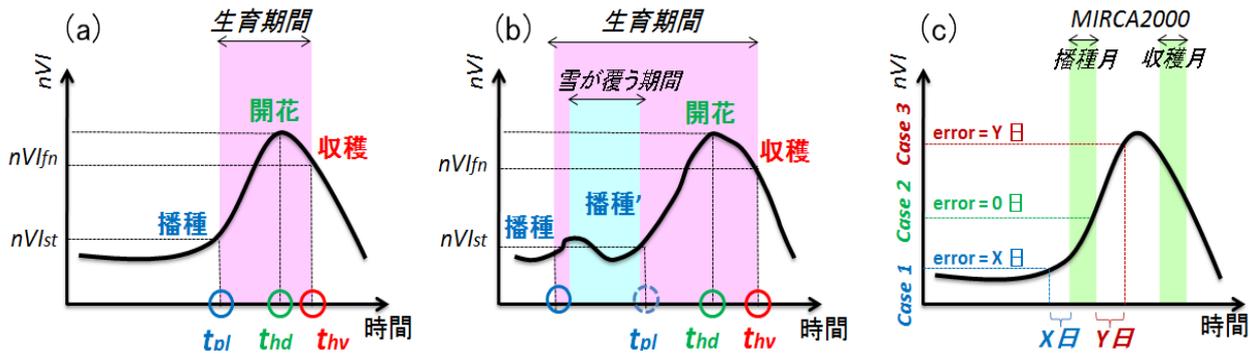


図-2 植生指標を用いた農事暦 (plant, harvestの時期) 決定手法の概念図. 生育期間の開始と終了を決定するパラメータ ( $nVIst$ ,  $nVIfn$ ) と, 正規化植生指標 ( $nVI$ ) の時系列情報により農事暦を決定する. (a) に示される一般的な作物成長には適用可能であるものの, (b) に示される様な生育期間に一度雪に覆われる作物 (e.g. 冬小麦) の播種期には適用できない点が課題である. (c) は, MIRCA2000 を用いて  $nVIst$  と  $nVIfn$  を決定する際のエラー値の算出概念を示している.

では2004 - 2006年の平均VIを用いて農事暦を決定する.

## (2) 農事暦の決定手法 (図-1 (a))

農事暦の決定手法の概念図を図-2(a), (b) に示す. 生育期間の開始と終了を決定するパラメータ ( $nVIst$ ,  $nVIfn$ ) と, 正規化植生指標 ( $nVI$ ) の時系列情報により農事暦を決定する. なお, これ以後で記述するVIは, NDVI, EVI, SAVIの総称であり, いずれのVIにも適用可能である.

$$nVI(i) = \frac{VI(i) - VI_{tail}}{VI_{max} - VI_{tail}} \quad (4)$$

$$VI_{tail} = \min(VI_{min}, VI_{thresh}) \quad (5)$$

$$t = \begin{pmatrix} t_{pl} \\ t_{hv} \end{pmatrix} \text{ when } \begin{cases} t \leq t_{hd}, nVI(t) > nVIst \\ t \geq t_{hd}, nVI(t) < nVIfn \end{cases} \quad (6)$$

ここに,  $nVI$  は正規化植生指標 (-) であり, 最大1の値をとる.  $VI_{max}$  と  $VI_{min}$  は年最大と年最少VI (-),  $t_{pl}$  は生育開始日 (day),  $t_{hv}$  は生育終了日 (day),  $t_{hd}$  はVIが最大となる日 (day),  $nVIst$  と  $nVIfn$  は生育開始時と生育終了時の  $nVI$  (-) である.  $VI_{thresh}$  は設定したVIの下限値であり, NDVIの場合は0.2, SAVIとEVIの場合は0.1とした.  $nVIst$  と  $nVIfn$  は作物種類別に与える事が可能なパラメータである. 本研究の農事暦決定手法は, 図-2(a) に示される一般的な作物成長には適用可能であるものの, 図-2(b) に示される生育期間に雪に覆われる作物 (e.g. 冬小麦) の播種期には適用できない点が課題である. これは, 雪解け後の  $nVI$  の立ち上がり期を耕作開始時期と判断してしまうためである. Yorozu *et al.*<sup>7)</sup> は,  $nVIst$  と  $nVIfn$  を全ての作物に対して0.3, 0.7としていた. 本研究では, 全球作物分布情報を用いて  $nVIst$  と  $nVIfn$  を作物別に決定する.

## (3) 耕作期決定パラメータの推定手法 (図-1 (b))

MIRCA2000を用いて  $nVIst$  と  $nVIfn$  を推定する. 全球5分解像度のデータセットであるMIRCA2000は, 各グリッドで, 26種の作物の耕作率, 及び, 主要作物の農事暦を

整備している. ただし, 合計402の国・州の統計データに基づくプロダクトであり, 同じ国・週であれば同じデータとなる. MIRCA2000からは, 各グリッドの 1) 最も面積率の高い作物(主要作物), 2) 主要作物の播種月と収穫月, 3) グリッドの総農地面積に対する主要作物の面積率(主要作物面積率)の3つのデータを使用する. 耕作期決定パラメータは以下の手順で推定される.

### a) 全球農地VIの作成

MIRCA2000の解像度に合わせるため, Spot Vegetation データから計算した1km解像度のVIは, 5分解像度に集約される. この際, 2つの全球地表面データ(Global Land Cover Characterization version 2.0及びEcoclimap, 共に1km解像度)を用いて, 両プロダクトが共に天水農地か灌漑農地と判定したグリッドのみを用いて平均し, 5分解像度の全球農地VIを作成する.

### b) 冬作物の判別

MIRCA2000において, 播種月と収穫月の期間中に, そのグリッドの気温最低月がある場合は冬作物と判別する. 気温のデータには, 統計値も用いて作成された再解析データ<sup>10)</sup>を用いる. この手順により, MIRCA2000で小麦として与えられたグリッド情報を, 冬小麦と春小麦の別作物の情報に分離して扱う事が可能になる. 例えば冬小麦は, 図-2(b) に示した様に, 地域によっては冬季に雪で覆われる. しかしながら, 春小麦はどの地域においても図-2(a) の様な生育となる. こういった異なる生育特性を反映する為, 本研究では冬作物を判別した.

### c) 使用グリッドの制約

402の国・州からは, 農地面積率が高い5グリッドを使用する. ただし, 主要作物面積率が25%以下のグリッドは対象から外す. a), c) の手順は, 森林や他作物のフェノロジーが対象作物のフェノロジーに混じるミクセル問題を極力低減するための手順である. しかしながら, 元データであるVIのミクセル問題や, 地表面被覆の不確実性を完全に排除している訳では無い事に留意する必要がある.

表-2 本研究で推定した6作物の耕作期決定パラメータとYorozu *et al.* (2005)の提案値. 世界で灌漑されている, 冬小麦, 春小麦, トウモロコシ, 稲, 大豆, 綿花の値を示している. パラメータは, NDVI, EVI, SAVIに対してそれぞれ推定された.

作物種	本研究						Yorozu <i>et al.</i>	
	NDVI		EVI		SAVI		NDVI	
	<i>nNDVIst</i>	<i>nNDVifn</i>	<i>nEVIst</i>	<i>nEVifn</i>	<i>nSAVst</i>	<i>nSAVifn</i>	<i>nNDVIst</i>	<i>nNDVifn</i>
冬小麦	0.24	0.44	0.21	0.34	0.23	0.42	0.3	0.7
春小麦	0.21	0.56	0.20	0.68	0.16	0.62		
トウモロコシ	0.23	0.59	0.3	0.51	0.23	0.46		
稲	0.26	0.69	0.28	0.56	0.27	0.59		
大豆	0.21	0.39	0.22	0.34	0.15	0.33		
綿花	0.20	0.35	0.23	0.33	0.25	0.3		

表-3 本研究で作成した農事暦と, 小槻ら(2012), Hanasaki *et al.* (2008) で作成された農事暦の, 各作物主要国でのWAOB1994への適合率(%). 緑ラベルは, 播種期(Plant)と収穫期(Harvest)の適合率が高かった手法を示している. ここで適合率の高かった手法は, 適合率の合計が150%以上の手法とした.

作物種	本研究						小槻ら		Hanasaki <i>et al.</i>	
	(a) NDVI		(b) EVI		(c) SAVI		(d) NDVI		(e) 作物モデル	
	Plant	Harvest	Plant	Harvest	Plant	Harvest	Plant	Harvest	Plant	Harvest
冬小麦	9.	29.	2.	18.	3.	26.	7.	29.	61.	40.
春小麦	93.	86.	78.	89.	82.	77.	91.	95.	60.	51.
トウモロコシ	79.	46.	80.	54.	79.	52.	78.	42.	76.	61.
稲	78.	92.	81.	87.	82.	89.	82.	91.	71.	72.
大豆	47.	62.	52.	55.	49.	61.	43.	42.		
綿花	75.	100	71.	88.	56.	82.	45.	75.		

#### d) 耕作期決定パラメータの推定

MIRCA2000で扱う26作物に, 本研究で冬作物とした4作物を加えた, 30作物について*nVIst*と*nVifn*を推定する. 播種期, 収穫期についてそれぞれ, パラメータを0から1まで移動させ, 全球のerror平均値が最も小さくなる値を*nVIst*と*nVifn*とする.

グリッドのerror値算出概念図は図-2(c)に示される. MIRCA2000で得られる播種期・収穫期は, 月単位である. その範囲に入る場合(e.g. case 2)はerror値が0となり, それ以外の場合(e.g. case1, case3)は最も近いMIRCA2000の範囲からの差をerror値とする.

全球で各作物の*nVIst*と*nVifn*を一定とする理由は, 本手法の主眼が, 全球スケールで農事暦の推定にあるためである. 地域スケールでは, 参照教師データを準備し, 作物の播種・開花・収穫期をVIから推定する研究がなされている (e.g. Sakamoto *et al.*<sup>6)</sup>). しかし, 無統計地域で農事暦を推定する必要があるため, 全球で各作物の*nVIst*と*nVifn*を一定とした. 本質的には, ミクセル問題等が無ければ, 地域によって決定される*nVIst*と*nVifn*に, 大きな違いは無いと考えられる.

本研究で推定した6作物の耕作期決定パラメータとYorozu *et al.*<sup>7)</sup>の提案値を表-2に示す. 最終的に灌漑モデルの入力となる農事暦データを作成しているため, 世界で広く灌漑されている, 冬小麦, 春小麦, トウモロコシ, 稲, 大豆, 綿花の推定値を示している. 続く3章では, これらの推定値とVIから作成された農事暦の精度を比較・検証し, 考察を進める.

### 3. 結果と考察

#### (1) 作成した農事暦の比較・検証 (図-1(c-1))

作成した農事暦を統計ベースの農事暦プロダクト World Agricultural Outlook Board of the U. S. Department of Agriculture 1994(以下WAOB1994)<sup>11)</sup>, 及び, Hanasaki *et al.*<sup>1)</sup>と比較し・検証する. Hanasaki *et al.*は, モデル計算により収量が最大化される様に農事暦を推定している. ここで, 検証する際に統計データをしてWAOB1994を用いたのは, MIRCA2000やSACKSは, 播種期・収穫期を特定の1月としてプロダクトを作成しているためである. 実際には, 同じ地域であっても播種・収穫期は幅を持つ. さらに, MIRCAやSACKSの作成に用いた元データが広範囲の国・州であった場合は, その幅はより大きくなると考えられる. 耕作期決定パラメータの推定に用いるMIRCAは2000年の世界の農事暦, 検証に用いるWAOB1994は1994年以前のデータベースである. その間に, 各作物農事暦の大幅な移動は起こっていないと考えられるため, 本研究では対象期間の異なる二つのデータベースをパラメータの推定及び検証データとして用いた.

本研究で3つのVIを用いて作成した農事暦と, 小槻ら<sup>2)</sup>, Hanasaki *et al.*<sup>1)</sup>で作成された農事暦の, 各作物主要国でのWAOB1994への適合率を表-3に示す. 緑ラベルは, 播種期と収穫期の適合率が高かった手法を示している. ここで適合率の高かった手法は, 適合率の合計が150%以上の手法とした. 表-3(a)と(d)の比較から, 全球作物

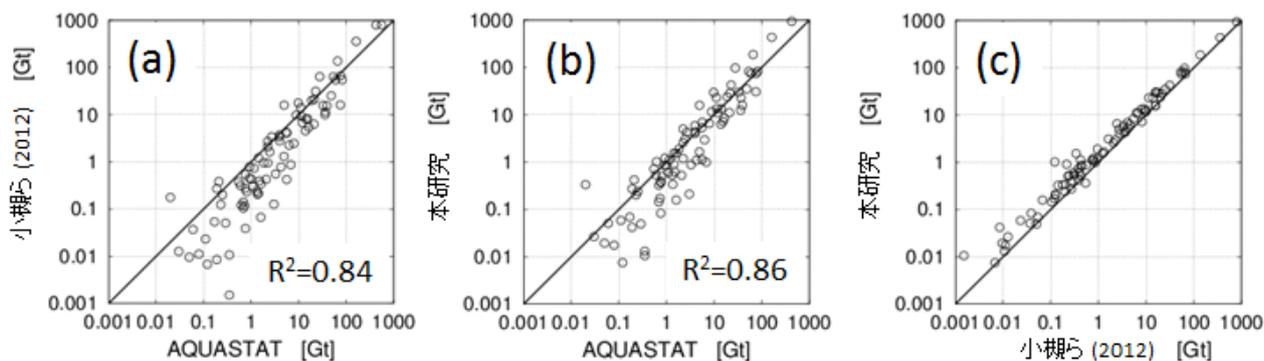


図-3 作成した農事暦を用いて解析された農業水需要量の比較。(a)は小槻ら(2012)とAQUASTAT, (b)は本研究とAQUASTAT, (c)は小槻ら(2012)と本研究の比較をそれぞれ示している。一つのプロットが一つの国に対応している。

分布情報MIRCAを用いた農事暦決定パラメータ推定の改善効果を計る。表-3(a)と(b), (c)の比較から, 新たな植生指標SAVIとEVIを用いる事による改善効果を計る。表-3(a), (b), (c)と(e)の比較からは, 本研究の農事暦と, 作物生育モデルによる推定農事暦の違いを計る。

本研究で新たに試みたEVI, SAVIとNDVIの結果を比較すると(表-3(a)と(b), (c)の比較), 総じて各VIの適合率の差は小さく, 春小麦・綿花以外は同程度の適合率である。差が小さかったのは, 本手法ではVIの違いがそれほど重要ではないか, 若しくは, VIのミクセル問題や地表面被覆の不確実性が, 各VIの違いに比してより顕著であった理由が考えられる。

本研究でNDVIにより推定した結果と小槻ら<sup>2)</sup>の結果を比較すると(表-3(a)と(d)の比較), 春小麦・トウモロコシ・稲の適合率は同程度である。一方で, 大豆と綿花の農事暦には改善が認められる。表-2に示した様に, 大豆と綿花は, 推定した $nNDVI_{st}$ と $nNDVI_{fn}$ がYorozu *et al.*<sup>7)</sup>と大きく異なる。MIRCA2000を用いて両パラメータを同定することにより, 綿花・大豆の農事暦が改善したと考えられる。一方で, 春小麦・トウモロコシ・稲のパラメータは, Yorozu *et al.*<sup>7)</sup>からの差が小さく, 作成した農事暦の適合率にも大きな変化が無かったといえる。

VIで推定した結果とHanasaki *et al.*<sup>1)</sup>により推定した結果を比較すると(表-3(a), (b), (c)と(e)の比較), 冬小麦でVIの適合率が非常に低い。これは, 小槻ら<sup>2)</sup>の指摘する様に, 雪解け後の $nVI$ の立ち上がり期を耕作開始時期と判断してしまうためである(図-2(b))。一方で, 春小麦・稲については, 同程度以上の結果を得ている。ただし, 結果が悪かった冬小麦についても, 実際に灌漑を要するのは農地を覆う雪が解けた後であるため, 灌漑期を知る上での農事暦としては利用可能であると考えられる。冬小麦における収穫期の適合率が低いのは,  $nVI$ を決定する際の $VI_{min}$ が雪で覆われるか否かで大きく異なるためだと考えられる。その影響を極力取り除くため, 本研究では下限値として $VI_{thresh}$ を設定していた。冬小麦の農事暦については, 今後更に改善を図る必要がある。

## (2) 解析した農業水需要量の比較・検証 (図-1(c-2))

本研究, 及び, 小槻ら<sup>2)</sup>の手法により作成した農事暦を用いて, 全球の農業水需要量を解析した。VIには, どちらもNDVIを用いた。農業水需要量は, 陸面過程モデルSiBUC(Simple biosphere model including urban canopy)<sup>12)</sup>を用いて解析し, 農事暦以外の解析条件は小槻ら<sup>2)</sup>と同じとした。比較する世界各国の農業取水量データは, FAOが提供している統計データ(AQUASTAT)<sup>13)</sup>で公開されている。灌漑効率にDoll and Siebert<sup>14)</sup>を参照し, モデルの出力する要求水量から, AQUASTATの提供する取水量を算出した。

作成した農事暦を用いて解析された農業水需要量の比較を図-3に示す。図-3(a)は小槻ら<sup>2)</sup>とAQUASTAT, 図-3(b)は本研究とAQUASTAT, 図-3(c)は小槻ら<sup>2)</sup>と本研究の比較をそれぞれ示している。いずれも, 一つのプロットが一つの国に対応している。図-3(a)と(b)の比較からは, 全球作物分布情報MIRCAを用いた農事暦決定パラメータ推定の改善効果が見える。図-3より, 本研究で作成した農事暦を用いた場合, 小槻ら<sup>2)</sup>に比してより多くの農業水需要が算出されており, 決定係数で改善が確認された。本研究の農業水需要量が小槻ら<sup>2)</sup>に比して, どの国でも多くなったのは, 耕作期間が長くなったためである。表-2に示した様に, 本研究の耕作期決定パラメータは,  $nNDVI_{st}$ と $nNDVI_{fn}$ が共にYorozu *et al.*<sup>7)</sup>よりも小さい。特に, 大豆と綿花の農事暦の改善と耕作期間の長期化により, 決定係数が改善されたと考えられる。

## (3) 植生指標を用いた農事暦の改善可能性

植生指標から作成する農事暦の課題を2点挙げる。1点目は, 既に指摘した冬作物の農事暦決定方法である。2点目は, トウモロコシや大豆の適合率の様に, 夏季作であっても統計データへの適合率が低い作物農事暦についても改善を図る必要がある。

特に後者は, ミクセル問題や地表面被覆データの不確実性に依るところが大きいためと考えられる。最近の比較研究では, グリッドごとの土地被覆の一致度は60%程度とされている<sup>15)</sup>。計算グリッドの平均農地VIを算出する際

の地表面被覆の不確実性については、1km解像度の地表面被覆データをより多く使用することにより低減可能であると考えられる。一方で、ミクセル問題については有効な解決方法は見当たらない。

どちらの課題に対しても有効な方法として、衛星観測VIと作物生育モデルの併用が考えられる。地表面の植生成長を時系列の変化として捉えるというVIの利点と、作物成長が気象条件に依存するという作物生育モデルの利点の双方が利用可能となる。特に、作物生育モデルの最大の弱点である播種期の決定に対して、衛星観測VIの活用は有効である。本研究で行った、MIRCA2000を用いた耕作期決定パラメータの推定は、最初に挙げた3手法のうち、統計情報と衛星手法の双利用とも言える。今後は、作物生育モデルの長所も活かした、3手法の利点を併せ持つ農事暦の作成手法を開発していく方針である。

#### 4. まとめ

本研究では、2点の新たな試みにより、作成する全球農事暦の高精度化を図った。1点目は、新たな植生指標としてEVI, SAVIを用いる点である。2点目は全球作物分布情報を用いて耕作期決定パラメータを推定する点である。本研究では、これらの試みにより、農事暦のそのものと、農事暦を使用して解析した農業水需要量が、改善されるか否かを議論した。

NDVI, EVI, SAVIを用いて決定された農事暦は、統計データWAOB1994に対して、綿花を除いて同程度の一致度であった。本手法ではVIの違いがそれほど重要ではないか、若しくは、VIのミクセル問題や植生指標の不確実性が、VIの違いに比してより顕著であったと考えられる。

全球作物分布情報を用いて耕作期決定パラメータを推定することにより、大豆・綿花の農事暦が改善された。

その一方で、春小麦・稲・トウモロコシに対しては有意な改善は得られなかった。耕作期間決定パラメータを推定することにより、扱った6作物の全て、特に大豆・綿花の耕作期間が長くなり、農事暦を用いて解析された農業水需要量の改善が確認された。

現状の課題としては、衛星データを取り扱う際に常に起こるミクセル問題への対処と、地表面被覆の不確実性への対処がある。今後は、作物生育モデルの長所も活かした、3手法の利点を併せ持つ農事暦の作成手法を開発していく方針である。

**謝辞:** 本研究を進めるに当たり、貴重なデータを国立環境研究所の花崎直太博士から提供して頂きました。記して謝意を示します。

#### 参考文献

1) Hanasaki N, Kanae S, Oki T, Masuda K, Motoya K, Shirakawa

N, Shen Y, Tanaka K: An integrated model for the assessment of global water resources—part 2: applications and assessments, *Hydrol. and Earth Syst. Sci.*, Vol.12, p.1007-1025, 2008.

- 2) 小槻峻司, 田中賢治, 小尻利治, 浜口俊雄: 衛星データから作成した農事暦を活用した全球陸域水循環解析, *水文・水資源学会誌*, Vol. 25-6, p.373-388, 2012.
- 3) Portmann FT, Siebert S, Doll P: MIRCA2000—Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.24, p.1-24, 2010.
- 4) Sacks WJ, Deryng D, Foley JA, Ramankutty N: Crop planting dates: an analysis of global patterns, *Global Ecology and Biogeography*, Vol.19, p.607-620, 2010.
- 5) Krysanova V and Wechsung F: SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual, *Potsdam Institute for Climate Impact Research: Potsdam*; p.1-32, 2000.
- 6) Sakamoto T and Coauthors: A two-step filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data, *Remote Sens. Environ.*, Vol.110, p.2146-2159, 2011.
- 7) Yorozu K, Tanaka K, Ikebuchi S: Creating a global 1-degree dataset of crop type and cropping calendar through timeseries analysis of NDVI for GSWP simulation considering irrigation effect, *Proceedings of 85th AMS Annual Meeting, 19th Conference of Hydrology: J6.8*, 2005.
- 8) 日本リモートセンシング学会: 基礎から分かるリモートセンシング, 理工図書: 東京, p.213, 2011.
- 9) Viovy N, Arino O, Belward AS: The Best Index Slope Extraction (BISE): a method for reducing noise in NDVI time-series, *Int. J. Remote Sens.*, Vol.13, p.1585-1590, 1992.
- 10) Hirabayashi Y, Kanae S, Motoya K, Masuda K, Doll P: A 59-year (1948-2006) global near-surface meteorological data set for land surface models, *Hydrological Research Letters*, Vol.2, p.36-40, 2008.
- 11) World Agricultural Outlook Board US Department of Agriculture: Major World Crop Areas and Climate Profile, *US Department of Agriculture: Washington DC*; p.279, 1994.
- 12) Tanaka K: Development of the New Land Surface Scheme SiBUC Commonly Applicable to Basin Water Management and Numerical Weather Prediction Model. Doctoral Dissertation, Graduate School of Engineering, Kyoto University, p.1-289, 2004.
- 13) FAO: Review of agricultural water use per country, 2005. [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water\\_use\\_agr/index.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use_agr/index.stm) (参照:2012/9/18).
- 14) Doll P and Siebert S: Global modeling of irrigated water requirements, *Water Resources Research*, Vol.38-4, p.1-10, 2002.
- 15) Herold M, Mayaux P, Woodstock CE, Baccini A, Schmillius C: Some challenges in global land cover mapping: an assessment of agreement and accuracy in existing 1km datasets, *Remote Sensing of Environment*, Vol.112, p.2538-2556, 2008.

(2013. 9. 30受付)